



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

POROVNÁNÍ ÚČINNOSTÍ ŘÍZENÍ PŘESNÉHO PŘIBLIŽOVÁNÍ LETADLA NA PŘISTÁNÍ POMOCÍ TRADIČNÍCH NAVIGAČNÍCH SYSTÉMŮ S ÚČINNOSTÍ NAVEDENÍ PODLE LADGPS

COMPARISON OF TRADITIONAL AERONAUTICAL PRECISE APPROACH NAVIGATION SYSTEMS
EFFICIENCIES WITH THAT OF THE LADGPS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Válek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

BRNO 2020



Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav

Student: **David Válek**

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: **doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.**

Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání účinností řízení přesného přibližování letadla na přistání pomocí tradičních navigačních systémů s účinností navedení podle LADGPS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analyzovat možnosti navedení podle ILS, MLS a PAR s hlasovým i rádiovým přenosem povelů. Poměrově vyjádřit jejich skutečné účinnosti. Porovnat tyto účinnosti s účinností navedení podle LADGPS, realizovaného na základě přijímače ProMark3 a vhodně volených korekcí. Korekční zprávu LADGPS nevysílat.

Cíle bakalářské práce:

Analyzovat požadavky na přesnost měření okamžitých poloh letadla v průběhu přibližování, které jsou na funkci ILS a MLS kladeny předpisem L10.

Analyzovat přesnost navedení na přistání, kterou může poskytnout PAR daného typu (RPL-5M).

Měření určit přesnost ProMark3.

Porovnat hodnoty a pravděpodobnosti výskytu chyb navedení pomocí jednotlivých zařízení.

Určit stupeň použitelnosti LADGPS pro řízení přesného přibližování letadel na přistání.

Seznam doporučené literatury:

KAYTON, M., FRIED, R.W.: Avionics Navigation Systems, second edition, John Wiley & Sons, Inc., 1996; ISBN 0-471-54795-6, New York.

VOSECKÝ, S. a kol.: Základy leteckých navigačních zařízení, učebnice Univerzity obrany v Brně (VAAZ), Brno, 1988.

PŘIBYL, K., KEVICKÝ, D.: Letecká navigace, Tisk, knižní výroba, Brno, 1980.

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

KULČÁK, L. a kol.: Air Traffic Management, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2002 ISBN 80-7204-229-7.

KULČÁK, L., BLAŠKO, P., DENDIS, T., PALIČKA, L.: Zabezpečovacia letecká technika, Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, 1999, ISBN 80-7100-584-3.

Učebnice pilota, nakladatelství Svět křídel, Praha, 2003, ISBN 80-85280-89-2.

STAVOVČÍK, B.: Obecná navigace, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2008.

VOSECKÝ, S.: Radionavigace, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2006, ISBN 80-720-448-6.

KULČÁK, L. a kol.: Učebnice pilota vrtulníku PPL(H), část II, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2009, ISBN 978-80-7204-638-6.

Manuál pro obsluhu ProMark3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce pojednává o možnostech využití technologií a prostředků satelitní navigace v civilní letecké dopravě, se zaměřením na přesné přístrojové přiblížení dopravních letounů. V práci jsou popsány tradiční systémy pro navádění letounů v konečné fázi letu, jejich vlastnosti, principy činnosti, výhody i nevýhody. Stejně tak je popsána technologie satelitní navigace i její subsystémy, které přispívají ke zvýšení přesnosti a bezpečnosti těchto naváděcích prostředků. Analýzou vlastností a účinností všech zařízení bylo dosaženo závěru, kterým by se mohla naváděcí technologie v budoucnu ubírat.

Klíčová slova

Satelitní navigace, přesné přístrojové přiblížení, přesnost, přistání, globální navigační systémy, systémy přesného přiblížení, mikrovlnný přistávací systém, přibližovací radar

Abstract

This work deals with the possibilities of using technologies and means of satellite navigation in civil air transport, focusing on the precise instrument approach of transport aircraft. The work describes traditional systems for guiding aircraft in the final phase of flight, their characteristics, principles of operation, advantages and disadvantages. Similarly, satellite navigation technology and its subsystems are described, which contribute to improving the accuracy and safety of these guidance devices. By analysing the characteristics and efficiency of all devices, a conclusion has been reached that the guidance technology could take hold in the future.

Key words

Satellite navigation, precision instrument approach, accuracy, landing, global navigation systems, precision approach systems, microwave landing system, approach radar

Bibliografická citace

VÁLEK, David. *Porovnání účinností řízení přesného přibližování letadla na přistání pomocí tradičních navigačních systémů s účinností navedení podle LADGPS* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125369>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Slavomír Vosecký.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci na téma „Porovnání účinností řízení přesného přibližování letadla na přistání pomocí tradičních navigačních systémů s účinností navedení podle LADGPS“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s využitím literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Datum

.....
David Válek

Poděkování

Tímto děkuji doc. Voseckému, za jeho čas, vedení a připomínky při vypracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat Ing. Imřišovi a JUDr. Hammerovi za jejich ochotu a užitečné tipy pro zpracování práce.

Obsah

1. Úvod	9
2. Manévr přiblížení	10
2.1 Rozbor manévru na přiblížení dle přístrojů	10
2.2 Přiblížení podle PBN	10
3. Shrnutí tradičních navigačních přístrojů	11
3.1 Systém ILS	11
3.2 Systém MLS	12
4. Nové metody navigace	14
4.1 PBN (Performance Based Navigation)	14
4.2 RNAV	14
4.3 RNP	15
5. Systém GNSS (Global Navigation Satellite System)	16
5.1 Princip systému GNSS	16
5.2 Galileo, EGNOS	17
6. Možnosti navedení podle ILS	18
6.1 Požadavky na přesnost měření podle předpisu L10	18
6.2 Výskyt chyb a jejich monitorování	19
7. Možnosti navedení podle MLS	20
7.1 Požadavky na přesnost podle předpisu L10	20
7.2 Výskyt chyb a jejich řešení	21
8. Přesný přibližovací radar (PAR)	23
8.1 Požadavky na přesnost podle předpisu L10	23
8.2 Chyby vyskytující se při činnosti PAR	24
9. Možnosti navedení podle GPS	24
9.1 Chyby GPS měření	26
9.2 Požadavky na přesnost podle předpisu L10	27
9.3 Přesnost přijímače ProMark3	28
9.4 Měření přesnosti GPS	28
10. Závěr	31
11. Seznam použitých zkratk	32
12. Seznam použité literatury a zdrojů	34
13. Seznam obrázků a tabulek	37

1. Úvod

Létání je krásná činnost, která naplňuje nejednu lidskou duši radostí a štěstím. Nemůžeme se však pouze vznášet v oblacích, někdy je potřeba také přistát na zem, v nejlepším případě takovým způsobem, že se za letecké berany posadíme ještě mnohokrát.

Vývoj letecké dopravy šel vždy ruku v ruce s vývojem navigačních technologií, které dnes usnadňují život všem pilotům na světě. S rostoucím vzdušným provozem se však začaly zvyšovat také nároky na jednotlivá navigační zařízení, s ohledem na jejich přesnost a spolehlivost. V dnešní pokrokové době již máme spoustu možností jak letadlo bezpečně a přesně navigovat jak po dané trati, tak i na přistání.

První takovou technologií byl systém ILS (Instrument Landing System), který se začal vyvíjet ve 40 letech minulého století. I přes své technologické stáří se tento elektronický systém využívá dodnes. Princip systému se zakládá na dvou radiových vysílačích, které vysílají dva rozdílné signály jak v horizontální, tak ve vertikální rovině. Podle toho, který z přijímaných signálů převyšuje, pilot pozná polohu letadla vůči přistávací dráze. Respektive zjistí, jak moc se odchyluje od tzv. sestupové a kursové roviny. Vylepšenou verzí systému ILS bylo zařízení MLS (Microwave Landing System). Na rozdíl od systému ILS, kdy piloti letadel mohou zvolit jen jednu přibližovací trajektorii, u MLS je volba trajektorie možná. Další výhodou je např. možnost většího počtu naváděných letadel současně. Princip činnosti je velmi podobný s principem ILS. Stejně jako ILS i MLS má vysílače sestupové a kursové roviny. Systém MLS však využívá tzv. Time Division Multiplex, což můžeme chápat jako dělení informací do časových intervalů. Díky tomu pak může palubní počítač jednoduše určit polohu letadla. S postupným vývojem v oblasti navigace pak světlo světa spatřila také metoda PBN. S ní přišlo dokonalejší navádění letadel po letových tratích a tím pádem také zvýšení kapacity vzdušného prostoru. Metoda je založená na výkonnostních požadavcích letounů. Ty jsou vyjádřeny v tzv. navigačních specifikacích, které jsou určeny metodami RNAV a RNP. Dalším stupněm vývoje byla technologie GNSS. Díky tomuto tzv. Globálnímu družicovému navigačnímu systému dokážeme za pomoci signálů ze satelitů na oběžné dráze velmi přesně určit naši polohu i čas. Mezi nejdůležitější vlastnosti tohoto systému patří především vysoká přesnost, nepřetržitá činnost, globální dostupnost a integrita čili pravděpodobnost toho, že v systému nenastane porucha, která by vyřadila systém z provozu. V dnešní době hraje technologie GNSS velmi významnou roli nejen v letectví, ale také v dalších dopravních a průmyslových odvětvích.

Cílem této práce je analyzovat požadavky na přesnost měření okamžitých poloh letadla při přiblížení u zařízení ILS, MLS, PAR typu RPL-5M a metody LADGPS.

V první části si popíšeme přibližovací manévry, jeho jednotlivé úseky a druhy přiblížení. Poté si popíšeme systémy pro přesné přiblížení ILS a MLS, jejich vlastnosti, složení a principy činnosti jednotlivých zařízení. Dále se zaměříme na metodu PBN a s ní spjaté aplikace RNAV a RNP. Vysvětlíme si rozdíly mezi těmito metodami a popíšeme si požadavky a použití jednotlivých navigačních specifikací. Poté se seznámíme s technologií GNSS. Popíšeme si jednotlivé segmenty a jejich úlohy. Představíme si evropský navigační systém Galileo a jeho subsystém EGNOS, který slouží ke zlepšování výkonů a rozšiřování možností právě systému Galileo.

Ve druhé části práce se pokusím porovnat jednotlivá zařízení. Zaměřím se na požadavky na přesnost, hodnoty naměřených chyb a pravděpodobnost jejich výskytu.

2. Manévr přiblížení

2.1 Rozbor manévru na přiblížení dle přístrojů

Zaužívané postupy manévru přiblížení podle přístrojů se zakládají na navigačním vedení, jež poskytují pozemní systémy. Tento manévr se skládá z několika úseků:

- Přílet
- Počáteční přiblížení
- Střední přiblížení
- Konečné přiblížení
- Nezdařené přiblížení

Tyto úseky jsou rozděleny pomocí tzv. fixů, což jsou body označující začátky a konce jednotlivých úseků. Konkrétně to jsou: Fix klesání, Fix počátečního přiblížení, Fix středního přiblížení, Fix konečného přiblížení, Fix vyčkávání při nezdařeném přiblížení. Jsou tu však okolnosti, při kterých mohou některé úseky začínat v bodech, ve kterých se žádné fixy nenachází. Rozlišujeme dva druhy přiblížení. Prvním druhem je přiblížení přímé, u tohoto druhu se uvažuje postup, při kterém se směr přiblížení shoduje se směrem osy dráhy. Dalším způsobem je přiblížení okruhem. Tento způsob se praktikuje v případě nesplněných kritérií pro přímé přiblížení. Mezi tyto případy patří např. nevhodný terén, jenž má za následek nevyhovující směřování trati konečného přiblížení či nesprávný gradient klesání.¹

2.2 Přiblížení podle PBN

Navigací založenou na výkonnosti (PBN) se rozumí prostorová navigace založená na výkonnostních požadavcích pro letadla provozovaná na tratích ATS, na postupech přiblížení podle přístrojů nebo ve stanoveném vzdušném prostoru.³ U tohoto způsobu přiblížení bereme v úvahu tzv. použitelné navigační specifikace, což jsou:

- a) RNAV APCH
- b) RNAV AR APCH
- c) A-RNP

K tomu, aby pilot mohl využít postupu přiblížení podle PBN, musí před letem ověřit, že mají schválení k provozu s použitou navigační specifikací. Při dodatečných omezeních musí pilot zajistit kladené požadavky:¹

- 1.) Provoz všech požadovaných navigačních prostředků
- 2.) Správná funkce navigačního vybavení
- 3.) Platnost navigační databáze
- 4.) Data traťových bodů a úseků, s ohledem na publikovanou mapu

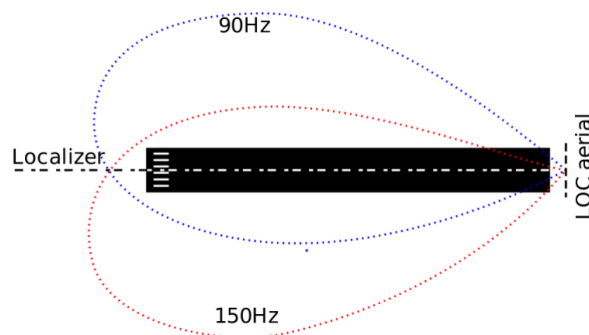
3. Shrnutí tradičních navigačních přístrojů

Tradiční přistávací systémy ILS a MLS už se v dnešní době vyspělé techniky považují za zastaralé technologie. I přesto dnes zastávají funkci navádění letadla na přistání, jakožto přesné a poměrně spolehlivé systémy přesného přiblížení.

Zaměřme se tedy nejprve na systém ILS a jeho funkce. Celá pozemní soustava tohoto zařízení obsahuje 3 základní druhy přístrojů: kursový maják, sestupový maják a návěstidla, u novějších sestav i DME.

3.1 Systém ILS

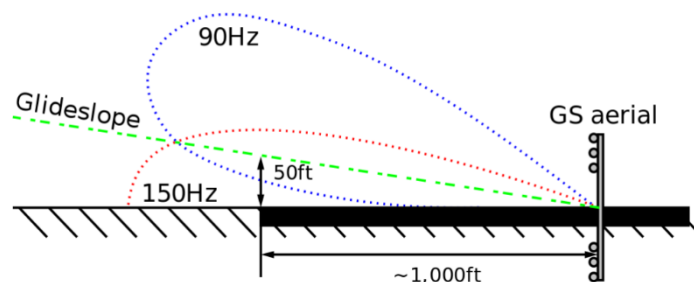
Podstata kursového majáku neboli Localizeru, spočívá v navádění letadla v horizontální rovině. Jedná se o směrový rádiový maják, jehož SVD vyzařuje ve směru osy přistávací dráhy a vytváří tzv. kursovou rovinu. Své signály pak LLZ vysílá pomocí několika antén. Ty jsou propojeny tak, že v prostoru přiblížení vytvářejí elektromagnetické pole na dané frekvenci.⁴ Tento anténní systém je potom nastaven takovým způsobem, že jeden signál je vychýlen doprava a druhý naopak doleva. Nosné vlny těchto signálů jsou amplitudově modulovány tak, že pravý svazek je namodulován na frekvenci 90 Hz a levý svazek na frekvenci 150 Hz. Díky tomu pak piloti dokážou určit polohu v horizontální rovině. Z pohledu pilota, převažuje-li signál o frekvenci 90 Hz, letadlo se nachází nalevo od kursové roviny a ukazatel na palubě se vychýlí směrem doprava. U signálu s frekvencí 150 Hz je tomu naopak. Pilot potom výchylky ručičky indikátoru koriguje ve snaze dostat se na kursovou rovinu, což je osa, ve které se modulace nosné vlny rovnají, jinými slovy, rozdíl modulace je nulový.²



Obrázek 1: Vyzařování signálů kursového majáku

Činnost sestupového majáku tzv. Glide Path Beaconu se principem a vlastnostmi velmi podobá kursovému majáku. Na rozdíl od LLZ však tento maják vytváří elektromagnetické pole pro navádění letadla ve vertikální rovině. Systém 2 antén vyzařuje signál, který v prostoru vytváří elektromagnetické pole. Horní anténa se nachází ve výšce asi 8 metrů a vysílá amplitudově modulovaný signál o frekvenci 150 Hz. Dolní anténa ve výšce zhruba 2 metrů vysílá taktéž amplitudově modulovaný signál, tentokrát na hodnotu 90 Hz.⁴ V praxi to znamená, že když pilot v letadle na přiblížení přijímá více signálu vysílaného horní anténou, tedy signálu o frekvenci 150 Hz, nachází se právě pod sestupovou rovinou. V případě převažujícího signálu vysílaného spodní anténou je tomu naopak. Stejně jako u LLZ sestupová rovina je osa, ve které

je nulová úroveň signálů. Tato rovina je potom vzhledem k dráze nakloněna o určitý úhel. Hodnoty úhlu potom variují v rozmezí od $2,5^\circ$ až do $5,5^\circ$. Standardně jsou to však 3° .²



Obrázek 2: Vyzařované signály GS

Nedílnou součástí systému ILS jsou také polohová návěstidla tzv. markery. Ty vyzařují směrem vzhůru a vytváří pomyslný kužel rádiových vln.⁴ Vysílače všech návěstidel pracují na kmitočtu 75 MHz. Tento signál je u jednotlivých markerů amplitudově modulován frekvencí, která na palubě vyvolá zvukový signál. Ten se liší podle toho, nad jakým návěstidlem se pilot právě nachází. Díky tomu pak pilot pozná vzdálenost od prahu dráhy. Frekvence, vzdálenosti od prahu dráhy a tvary signálů jednotlivých návěstidel jsou popsány v následující tabulce.²

Maják	Barva	Tvar signálu	Modulační frekvence	Vzdálenost od prahu
OM (vnější návěstidlo)	Modrá	2 čárky za sekundu	400 Hz	6,5 – 11,1 km
MM (střední návěstidlo)	Jantarová	Střídavě čárky a tečky	1 300 Hz	$1\,050 \pm 150$ m
IM (vnitřní návěstidlo)	Bílá	6 teček za sekundu	3 000 Hz	75 – 450 m

Tabulka 1: Signály polohových návěstidel

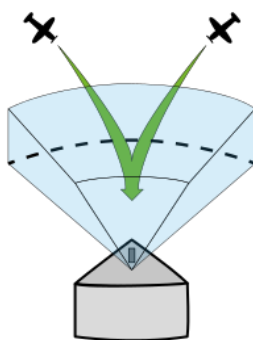
3.2 Systém MLS

Vyspělejším naváděcím systémem je MLS, který byl vyvíjen jako náhrada systému ILS. Jeho hlavními výhodami oproti systému ILS jsou např. použitelnost za každého počasí, menší rozměry, větší výkonnost a také možnost většího počtu naváděných letadel.⁶

Jak už jsem zmiňoval v úvodu, princip činnosti tohoto zařízení spočívá ve vysílání, které je rozděleno do časových intervalů tzv. Time Division Multiplexing. Tato technologie umožňuje vysílat na jediném kmitočtu řadu signálů tak, že každá vysílaná informace je soustředěna do předem zvolené části pevně zadaného časového cyklu vysílání signálů.² Perioda tohoto vysílání je velmi malá. Díky tomu pak může palubní počítač vyhodnotit okamžitou

polohu letadla a umožňuje také zvolit libovolnou trajektorii letu, což je další velká výhoda oproti systému ILS.

Mezi hlavní součásti systému MLS patří podobně jako u ILS vysílače signálů směrové a sestupové roviny a DME, které nahrazuje funkci markerů. Arsenal systému MLS je však o něco rozmanitější. K těmto 3 základním subsystémům se nyní přidává tzv. Back Azimuth, zařízení, jenž umožňuje pilotovi provést přiblížení v opačném směru. Konkrétně se jedná o sektor $\pm 20^\circ$ horizontálně a 15° vertikálně od osy dráhy. Vedle Back Azimuthu je to také tzv. Flare, který má za úkol poskytovat pilotovi informace pro řízení podrovnání.²

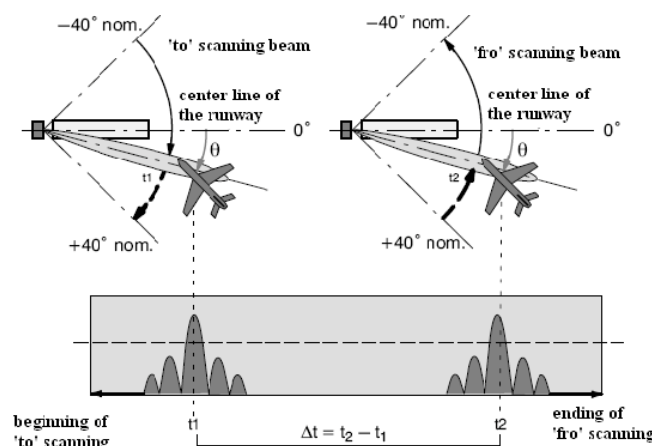


Obrázek 3: Prostor volby možných přiblížení

Činnost kursového majáku se zakládá na vysílání úzkého svazku, který se pohybuje stálou rychlostí z levého okraje sektoru k pravému a zpět. V praxi to znamená, že je tento svazek v jednom okamžiku zaměřen na letadlo. To způsobí vytvoření krátkého časového signálu na palubním přijímači. Počítač poté vyhodnotí okamžitou polohu letadla pomocí měření doby mezi příchodem prvního impulsu a následujícího impulsu.²

Řekněme tedy, že svazek se z pohledu pilota pohybuje zprava doleva. Nachází-li se letadlo přesně na ose dráhy, intervaly, které svazek urazí z krajních poloh k letadlu se budou rovnat. Avšak v případě, že se letadlo nachází např. napravo od podélné osy RWY rozdíl mezi intervaly se zvětší. Impuls se totiž na palubě objeví dříve než v případě letu v ose dráhy. Následný impuls se tedy na palubě objeví později. Minimální časový rozdíl by se v našem případě objevil, kdyby se letadlo nacházelo levé krajní poloze sektoru.²

Sestupový maják pracuje na stejném principu jako maják kursový, jen ve vertikální rovině. Na rozdíl od LLZ majáku však informaci o vertikální poloze vysílá 3x častěji. Díky tomu pak počítač detekuje okamžité odchylky od plánované trajektorie, která nemusí být nutně přímá, ale může být volena tak, jak vyžaduje situace nebo možnosti letadla.²



Obrázek 4: Princip činnosti azimutálního majáku

4. Nové metody navigace

4.1 PBN (Performance Based Navigation)

Zvyšování kapacity letového provozu, zlepšování přístupu na letiště nebo zajištění celosvětové standardizace specifikací oblastní navigace (RNAV) a požadovaného výkonu navigace (RNP), to jsou jedny z hlavních cílů metody PBN. Jak už ze samotného názvu vyplývá, metoda PBN je založena na výkonnostních požadavcích. Tyto nároky jsou vyjádřeny v navigačních specifikacích potřebných pro letadla provozovaná po letových trasách. Mezi ně patří přesnost, integrita, kontinuita a funkčnost. PBN je pak popsána prostřednictvím již zmiňovaných aplikací RNAV a RNP.⁷

4.2 RNAV

Cílem metody RNAV je umožnit provoz všem letadlům, která by se nacházela v dosahu jakéhokoliv pozemního či kosmického navigačního zařízení, na kterékoli požadované letové trati. V minulých letech se využívalo pozemních navigačních systémů jako jsou např. VOR nebo DME. Dnes už se však díky nástupu globálních navigačních systémů nabízejí nové možnosti využití metody RNAV. Se zdokonalenou přesností i bezpečností tato technologie začala hrát hlavní roli ve světě letecké dopravy. Jeho hlavními výhodami jsou:

- Kratší letové tratě
- Kratší doba letu
- Menší spotřeba
- Snížené horizontální rozestupy mezi letadly
- Možnost volby přímějších tratí

U metody RNAV dále můžeme rozlišovat 2 základní typy:

- Basic RNAV (B-RNAV)
- Precise RNAV (P-RNAV)

Rozdíl u těchto metod spočívá v jejich přesnosti určování polohy. U prvního typu se jedná o chybu do 5 NM v 95 % doby letu. U metody P-RNAV je to potom chyba do 1 NM.⁸

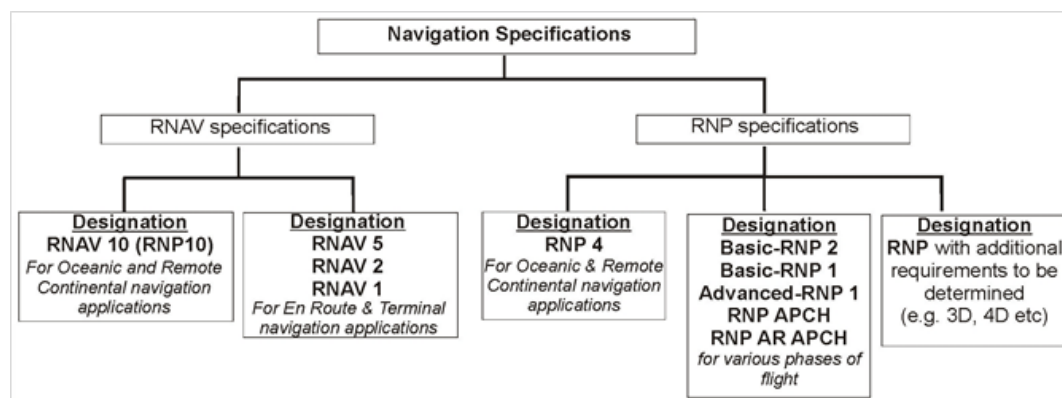
Provoz pomocí metody RNAV zajišťuje navigační počítač. Do něj piloti zadávají trasové body buď ručně nebo automaticky pomocí integrované databáze. Poté už pilotům stačí jen vytvořit trasu ze zadaných trasových bodů. Počítač pak porovnává, pomocí navigačních senzorů, skutečnou polohu letadla s nadefinovanou trasou a určuje jejich odchylku.⁸

U metody RNAV rozlišujeme 4 základní druhy navigačních specifikací. RNAV 10, která může být označována také jako RNP 10, je určena pro oceánské a dlouhé kontinentální lety (navigační aplikace). Další specifikací je RNAV 5. Ta je někdy označována jako tzv. B-RNAV. Ta se používá k navigaci letadel po trati a pro spojení s koncovými oblastmi. RNAV 2 je určena stejně jako RNAV 5 pro navádění po trati a v letištních oblastech. Poslední specifikace RNAV 1 neboli P-RNAV se používá k zajištění více cest a procedur v oblasti terminálů a může být využívána také k opravám konečného přiblížení.⁸

4.3 RNP

RNP určuje stupeň výkonnosti požadovaný pro konkrétní postup nebo určitý vzdušný prostor. Specifikace navigací RNAV a RNP se od sebe moc neliší. Jediným rozdílem je v požadavcích na sledování výkonů a varování pilotů v případě nesprávné funkce systému RNP. Z toho pak plyne větší důvěra ve výkonnost letadla při udržování letové trasy a tím pádem se nabízí možnost umisťovat trasy blíže k sobě.⁹

RNP rozlišuje 7 navigačních specifikací. Aplikace pro oceánskou a kontinentální navigaci využívají specifikací RNP 4 a RNP 2. RNP 1 je potom využívána u aplikací pro přilet, respektive pro počáteční, střední a nezdařené přiblížení. K těmto fázím letu se pak přidává také odletová navigace. Další specifikací je tzv. Advanced RNP. Je určena pro navigaci ve všech fázích letu. Pro navádění během přibližovacího manévru se užívají RNP APCH a RNP AR APCH. Rozdíl mezi těmito dvěma specifikacemi je ten, že u RNP AR APCH potřebujeme autorizaci, kterou zajišťuje Úřad pro civilní letectví státu, ve kterém je dané letadlo registrováno. Tato autorizace je potřebná z důvodu menších bočních a vertikálních vzdáleností od překážek při přistání.¹³ Poslední specifikací je RNP 0.3 a je určena pro kontinentální tratě, přiletové, odletové a přibližovací fáze letu. Avšak s výjimkou konečného přiblížení. Je využívána hlavně při provozu vrtulníků.⁹



Obrázek 5: Přehled navigačních specifikací

5. Systém GNSS (Global Navigation Satellite System)

Významnou roli v dnešním světě navigace hraje technologie GNSS, jejíž funkce usnadňují život nejen pilotům letadel, ale také uživatelům na zemi. Technologie GNSS se začala vyvíjet v 60. letech, kdy byla užívána zejména pro vojenské účely. Teprve až od roku 2000 byl systém zpřístupněn veřejnosti v plném rozsahu.

5.1 Princip systému GNSS

GNSS je tedy navigační satelitní systém, který k určení polohy na zemi využívá navigačních družic. Ty vysílají signál, který je na zemi zachycen pomocí antény GNSS přijímače. Procesor pak přijatý signál zpracuje a následně vyhodnotí aktuální polohu uživatele. Existuje více metod pro určování polohy na Zemi, např. metoda úhломěrná, dopplerovská nebo interferometrická. My se však budeme zabývat metodou dálkoměrnou. Základním principem funkce GNSS je totiž měření délek mezi uživatelem a navigační družicí. Abychom, jako uživatelé, mohli zjistit naši polohu v prostoru, potřebujeme měřit vzdálenosti současně od několika družic (pro zjištění 3D polohy minimálně od 4), protože kromě tří neznámých souřadnic x, y, z (poloha uživatele) je neznámou i čas. Ten je při měření vzdáleností základní jednotkou a znázorňuje dobu od vyslání družicového signálu do přijetí signálu přijímačem na Zemi. Přepočítáním tohoto naměřeného času na vzdálenost pak získáme tzv. pseudovzdálenost. Synchronizací všech údajů o vzdálenosti přijímač zjistí svou přesnou polohu vůči satelitům a převede ji do souřadnicového systému Země (zeměpisnou šířku, délku, výšku).^{10 2}

Signály z družic jsou přenášeny pomocí přenosových kanálů. Každý kanál vysílá rozdílné kódy. C/A kód je veřejný, trvalý a používá se v civilním provozu. Má délku periody 1 ms a je modulován kmitočtem 1,023 MHz. Prostřednictvím tohoto kódu je uživateli poskytována tzv. Standardní služba určování polohy (SPS), která se využívá také v civilní dopravě. Ve vojenském provozu se pak poskytuje tzv. Přesná služba určování polohy (PPS). Ta je poskytována pomocí signálu P(Y). Délka periody u tohoto kódu je 267 dnů a je modulována kmitočtem 10,23 MHz. P-kódy jsou neveřejné a civilní uživatelé k nim nemají přístup. Modernizace ve vojenských technologiích pak dala vzniknout kódu M. Tento signál je určen k náhradě kódu P(Y), jelikož poskytuje lepší výkon a větší flexibilitu.

Rozlišujeme 5 základních přenosových kanálů. Nosná frekvence kanálu L1 je 1 575,42 MHz a jsou jím přenášeny kódy C/A i P(Y). Mimo to je součástí přenosu také navigační zpráva. Ta má za úkol poskytovat uživatelům údaje potřebné k provádění měření vzdáleností a času. Mezi nezbytné informace patří:

- Čas a jeho chyby (časové korekce)
- Údaje o poloze navigační družice v momentě vyslání signálu
- Údaje o okamžitém stavu ionosféry
- Almanach (průběžně aktualizované údaje o poloze družic) + další zprávy

Kanál L2 vysílá na frekvenci 1 227,6 MHz. Přenáší pouze kód P(Y) a navigační zprávu. Počet přenosových kanálů se zvýšil po modernizaci navigačních družic. Kanál L3 vysílá na frekvenci 1 381,05 MHz a je určen převážně pro vojenské účely, kdy má za úkol detekovat jaderné

exploze. Kanál L4 slouží k měření chyb způsobených ionosférou a vysílá v pásmu 1 841,4 MHz. Kromě těchto kanálů byl aktivován také druhý nosný kmitočet pro civilní použití L5. Ten vysílá na frekvenci 1 176,45 MHz.

5.2 Galileo, EGNOS

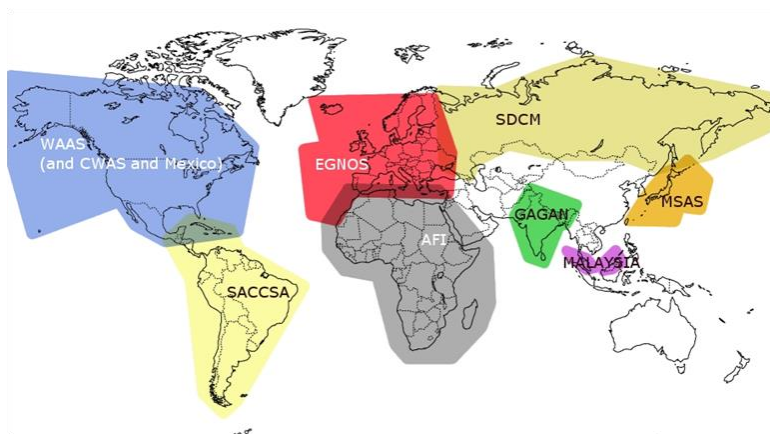
Stejně jako Spojené státy či Rusko i Evropa chtěla vybudovat svůj vlastní navigační systém. Tím se stal systém Galileo, který byl představen světu v roce 2002. První testovací družice byla vypuštěna v roce 2005. Systém byl uveden do provozu až v roce 2016, i když pouze v omezeném režimu. V plné síle by se měl Galileo předvést v roce 2020 s 24 družicemi v provozu.

Galileo je globální navigační satelitní systém, který poskytuje nejen přesnou navigační službu, kdy polohová přesnost má být 1 metr, ale slouží také jako velmi přesný zdroj času. Galileo je také interoperabilní s dalšími navigačními systémy, konkrétně s americkým GPS a ruským systémem GLONASS.¹⁵ To znamená, že jednotlivé systémy spolupracují a vzájemně si poskytují informace. Na rozdíl od nich je však Galileo pod civilní kontrolou, zatímco ostatní zmíněné systémy jsou kontrolovány armádami příslušných států.¹⁶

Jedním ze způsobů zlepšování výkonů a rozšiřování možností GPS/GNSS je metoda SBAS (Space Based Augmentation System), která využívá tzv. diferenčního GNSS. Tento režim zdokonaluje kosmický a řídicí systém tím, že zvyšuje přesnost měření a odstraňuje chyby, které se v procesu měření vyskytnou. Všechny tyto naměřené chyby se odesílají do výpočetního centra, kde se vypočítávají opravy naměřených odchylek. Poté se tyto „korekční zprávy“ vysílají pomocí satelitů a slouží jako rozšíření či překrytí původně vysílaných zpráv GNSS.¹⁷ Na světě operuje hned několik takových systémů SBAS:

- USA – WAAS (Wide Area Augmentation System)
- Japonsko – MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System)
- Indie – GAGAN (GPS and GEO Augmented Navigation)
- Čína – SNAS (Satellite Navigation Augmentation System)
- Jižní Korea – WADGPS (Wide Area Differential Global Positioning System)
- Rusko – SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring)
- Jižní Amerika – SACCSA (Augmentation Solution for Caribbean, Central and South America)
- Afrika – AFI (Africa-Indian Ocean)
- Malajsie – MALAYŚIA (Malaysia Navigation System)

V Evropě tuto funkci zastává EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). Ten pro přenos těchto korekčních zpráv využívá družic IMMARSAT. Díky tomu systém dokáže zajistit korekci GPS signálů a jejich integritu v široké oblasti se středem v Evropě. EGNOS také spolupracuje s ostatními systémy SBAS pracujícími v různých částech světa.¹⁷



Obrázek 6: Oblasti působnosti SBAS systémů

6. Možnosti navedení podle ILS

Podstatou systému ILS je navedení pilota na přistání do tzv. výšky rozhodnutí. Tato výška definuje okamžik, kdy pilot musí mít vizuální reference s RWY a jejím okolím, aby mohl provést ruční přistání. V opačném případě pak pilot musí zahájit postup pro nezdařené přiblížení.¹⁸

Podle předpisu L10 rozlišujeme 3 kategorie přesného přiblížení ILS. Každá kategorie definuje podmínky, které musí být splněny jak pozemním zařízením, tak i přístrojovým vybavením daného letadla. Uvažovanými kritérii jsou dráhová dohlednost společně s výškou rozhodnutí.¹⁸

- CAT I – výška rozhodnutí nad 200 ft a dráhová dohlednost (RVR) nad 550 m nebo dohlednost (VIS) nad 800 m
- CAT II – výška rozhodnutí pod 200 ft, ale nad 100 ft, dráhová dohlednost nad 300 m
- CAT III A – výška rozhodnutí pod 100 ft nebo bez omezení výšky rozhodnutí, dráhová dohlednost nad 175 m
- CAT III B – výška rozhodnutí pod 50 ft nebo bez omezení výšky rozhodnutí, dráhová dohlednost pod 175 m, ale nad 50 m
- CAT III C – bez omezení výšky rozhodnutí a dráhové dohlednosti

6.1 Požadavky na přesnost měření podle předpisu L10

K určení přesnosti systému ILS je třeba si určit referenční bod, ke kterému by se vztahovala veškerá měření nebo výpočty. Předpis tedy definuje tzv. bod „T“, neboli referenční výšku ILS. Jedná se o stanovenou výšku bodu ležícího na vertikále nad průsečíkem osy a jejího prahu, kterým prochází prodloužená klesající přímková část sestupové čáry. Tato výška je určena provozními předpisy daného letiště. Většinou se hodnota výšky bodu „T“ pohybuje kolem 50 ft nad středem prahu RWY.¹⁸

U střední kurzové čáry je seřízení prováděno s ohledem na dané meze, které se shodují s odchylkami střední kurzové čáry od osy RWY, právě v místě referenčního bodu „T“. Odchytky se pak u kurzových majáků v jednotlivých kategoriích liší.¹⁸

- CAT I: odchylka ± 35 ft
- CAT II: odchylka ± 25 ft
- CAT III: odchylka ± 10 ft

Požadavky na přesnost systému ILS ve vertikálním směru jsou stejně jako u kurzové roviny rozděleny podle kategorií.¹⁸

- CAT I: maximální vertikální odchylka sestupové trajektorie ve výšce 100 ft by neměla být větší než 10 ft
- CAT II a III: maximální vertikální odchylka sestupové trajektorie ve výšce 50 ft by neměla být větší než 4 ft

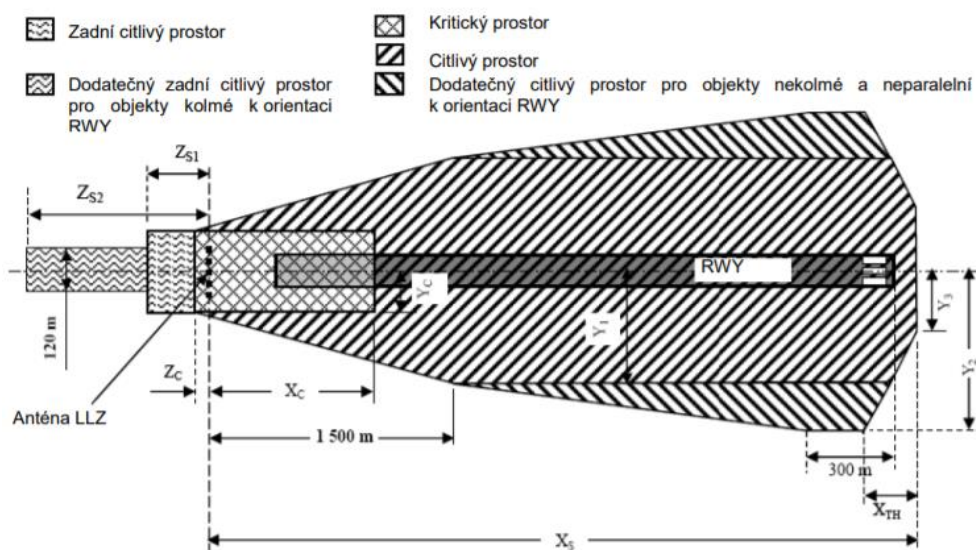
6.2 Výskyt chyb a jejich monitorování

I u systému ILS se můžeme setkat hned s několika nedostatky. Například ohyb vln vlivem atmosférických podmínek nebo nestabilita signálu vlivem odrazu od terénních nerovností, to jsou jen některé z chyb systému ILS. Dalším problémem je vysoká citlivost na překážky v blízkém okolí zařízení, které můžou vyvolávat nežádoucí zkreslení signálu. Z toho důvodu jsou na letištích v blízkosti sestupových a kurzových majáků zaváděny kritické a citlivé zóny.

Kritická zóna = oblast, ve které se v době činnosti ILS nesmí pohybovat žádné mobilní zařízení (ať už se jedná o automobil či letadlo)

Citlivá zóna = oblast, ve které se řídí pohyby vozidel i letadel takovým způsobem, aby se zabránilo možné interferenci signálu ILS

Rozměry těchto oblastí jsou stanoveny pomocí bezpečnostní analýzy a počítačových simulací, které berou v potaz parametry daných letišť, např. hustotu provozu, konfiguraci nebo topografickou situaci letiště. Výpočty se provádí před samotnou instalací systému.¹⁸



Obrázek 7: Příklad kritických a citlivých prostorů

K předejití nezjištěných závad a nesprávné funkce ILS probíhá nepřetržité, automatické monitorování systému. Jeho účelem je tedy zaručení potřebné integrity pro přibližovací postupy. Při vzniku jakékoliv odchylky, ať už u funkce jednotlivých majáků či polohových návestidel, se celý systém buď vypne nebo se přepne na záložní soupravu, pokud je k dispozici. Tato situace nastane dojde-li k:

- Vychýlení svazku sestupového nebo kurzového majáku
- Snížení výstupního výkonu

7. Možnosti navedení podle MLS

Díky vyzařování energie do okolí přistávací plochy v daném čase, systém MLS lépe zabráňuje interferenci s blízkými instalacemi. MLS také dokáže vysílat pomocná data, jako např. údaje o meteorologických podmínkách, informace o kondici přistávací dráhy nebo hodnoty rychlosti větru. Odchylky v kurzu u sestupového a kurzového majáku zapříčiněné letadly, vozidly a budovami, nyní nepředstavují problém, protože mikrovlnná energie není rozptýlena do všech směrů. Vysílání v pásmu 5031 - 5090 MHz tedy rozšiřuje možnosti umístění soupravy do terénu. Zavedení vyšších požadavků na přesnost systému MLS mělo za následek zabudování přesnějšího dálkoměrného zařízení DME/P.

7.1 Požadavky na přesnost podle předpisu L10

Stejně jako u zařízení ILS je zapotřebí určit si referenční výšku. Hodnota referenční výšky u MLS je 50 ft nad průsečíkem osy a prahu dráhy s tolerancí +10 ft a platí jak pro přiblížení, tak i pro zpětný kurz. Systémová přesnost je pak specifikována prostřednictvím parametrů PFE, PFN a CMN:¹⁸

- PFE = chyba zadání trajektorie – jedná se o část chyby signálu, která může vést k odchylce letadla od požadovaného kurzu nebo sestupu
- PFN = šum sledování trajektorie – část chyby signálu navedení, která může vyvolat odchylku letadla od střední čáry kurzu nebo sestupu
- CMN = šum řízení – část chyby navigačního signálu, která může ovlivnit ovládací systémy letadla a vyvolat pohyb při letu řízeném autopilotem, ale nevyvolá odchylku polohy letadla od žádaného kurzu nebo sestupu

Pro navádění v kurzu přiblížení i ve zpětném kurzu platí pro přesnost v referenční výšce tyto parametry:

- PFE nesmí být větší než ± 20 ft, doporučení udává odchylku $\pm 13,5$ ft
- PFN nesmí být větší než $\pm 11,5$ ft
- CMN nesmí být větší než $\pm 10,5$ ft nebo $0,1^\circ$ podle toho, co je menší

U navádění na sestupové rovině, uvažujeme-li sestupový úhel 3° , musí mít tato funkce v referenční výšce následující parametry:

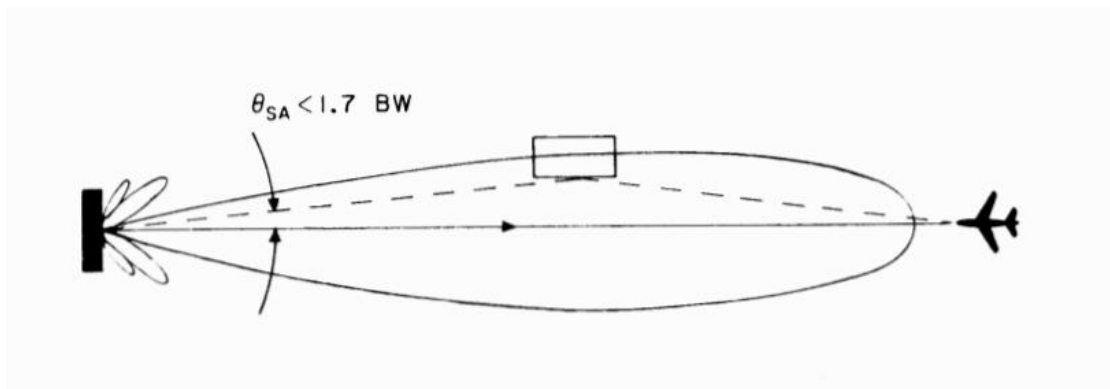
- PFE nesmí být větší než ± 2 ft
- PFN nesmí být větší než $\pm 1,3$ ft

- CMN nesmí být větší než ± 1 ft

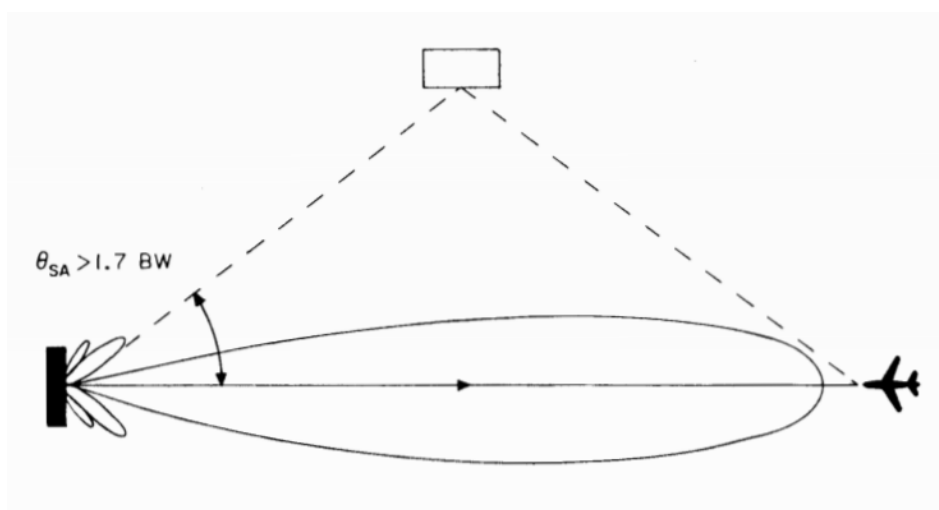
7.2 Výskyt chyb a jejich řešení

V předchozí podkapitole jsme si zadefinovali chyby, které nám určují přesnost systému. To však nejsou jediné chyby, které se v souvislosti s provozem tohoto zařízení mohou objevit. Mezi další škodlivé jevy patří vícecestné šíření a zastínění signálu.

Vícecestné šíření signálu může být způsobeno objekty vyskytujícími se v blízkosti zařízení. Letadla, auta nebo budovy mohou způsobit odraz nebo difrakci vysílaného signálu. Tento jev můžeme klasifikovat jako „šíření uvnitř laloku“ (in-beam) nebo „šíření mimo lalok“ (out-of-beam). Rozdíl mezi kurzem přiblížení a odrážejícím objektem se nazývá separační úhel. Ten můžeme považovat za jakousi odchylku, která udává, zdali se jedná o „in-beam“ odrazy nebo „out-of-beam“ odrazy. Pokud je separační úhel menší než $1,7^\circ$ jedná se o „in-beam“ odrazy. Ty mohou způsobit chyby ve vedení letadla a měly by být odstraněny. V případě, že hodnota separačního úhlu je větší než $1,7^\circ$, hovoříme pak o „out-of-beam“ odrazu. V této situaci bude parazitní signál vícecestného šíření přijímán v jiném čase než signál přímý a nezpůsobí tak chybu ve vedení.²⁰



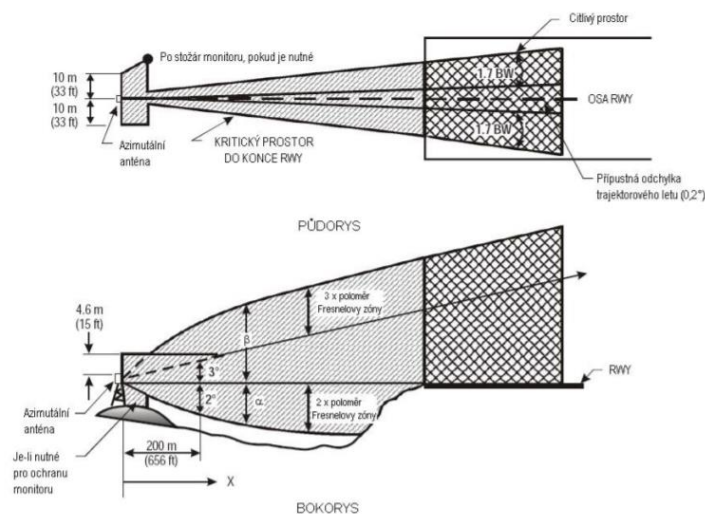
Obrázek 8: Vícecestné šíření uvnitř laloku (in-beam)



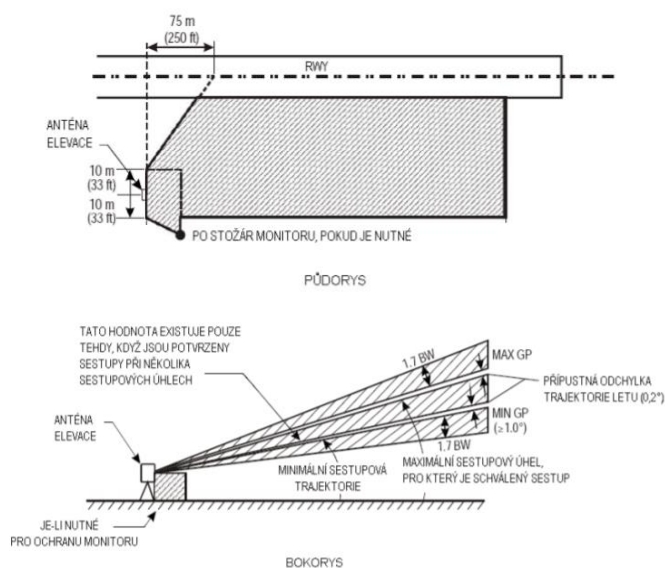
Obrázek 9: Vícecestné šíření mimo lalok (out-of-beam)

Zastínění signálu je také způsobeno blízkými objekty nebo terénem. Nastane-li situace, při které stínící objekt vyslaný signál zcela zastíní a překryje tak přímé spojení mezi palubním přijímačem a vysílačem na zemi, přijímač v letadle zachytí pouze difrakční signál, který je do určité míry zeslaben. Potencionální výskyt chyby ve vedení v důsledku zastínění signálu závisí na několika faktorech: útlum signálu, vícecestné šíření od jiných překážek nebo situace terénu.²⁰

Z důvodu těchto nedostatků bylo třeba zavést odpovídající opatření. Stejně jako u systému ILS, byly zavedeny kritické a citlivé prostory pro přiblížení na přistání, které by měly chránit od objektů pohybujících se v blízkosti zařízení. Přesný tvar prostorů závisí na umístění antén, vzdálenosti od prahu dráhy, výšce rozhodnutí, typu obsluhovaných letadel a podmínkách odrazů signálu.¹⁸



Obrázek 10: Typické kritické a citlivé prostory pro azimutální rovinu



Obrázek 11: Typické kritické a citlivé prostory pro vertikální rovinu

8. Přesný přibližovací radar (PAR)

PAR je druh radarového naváděcího systému, který slouží k detekci a navádění letadel při přiblížení na přistání. Tyto radary poskytují azimutální i vertikální vedení a umožňují bezpečné přistání i za zhoršených podmínek viditelnosti. Místo toho také dokážou měřit např. výšku základny oblačnosti. Jsou využívány zejména na vojenských letištích, kde plní úlohu podpůrných zařízení a zvyšují účinnost řízení a kontroly leteckého provozu. Při tomto druhu přiblížení pilot určuje polohu letadla za pomoci řídicího letového provozu. Ten sleduje polohu každého letadla na displeji, kde se zobrazují informace získané ze stranové a výškové antény. Pilot poté obdrží azimutové a výškové pokyny k udržení letounu na ose přiblížení, díky kterým může provést požadované korekce v řízení letu.²¹

8.1 Požadavky na přesnost podle předpisu L10

Rozměry krytého prostoru jsou jasně definovány. Radar by měl zajistit pokrytí v oblasti ohraničené v horizontální rovině úsekem o šířce 20° a ve vertikální rovině úsekem o šířce 7° a to do vzdálenosti nejméně 9 NM od antény radaru. Co se týče polohy radaru, musí být nastaven tak, aby pokryl oblast omezenou v horizontální rovině sektorem o šířce $\pm 5^\circ$ vzhledem k ose RWY. Vertikální rovina je pak ohraničena sektorem -1° až 6° . Dalším požadavkem je pokrytí celé oblasti, jejíž vrchol se nachází ve vzdálenosti 500 ft od bodu dotyku směrem ke konci RWY.¹⁸

Maximální přípustné chyby u přesnosti radaru v azimutu:

- Odchylka od osy přiblížení max. 0,6 % ze vzdálenosti letadla od antény PAR + 10 % odchylky letadla od osy přiblížení, nebo 30 ft (záleží na tom, která hodnota je větší)
- Chyba v bodu dotyku musí být menší než 30 ft
- Chyba zobrazení indikátoru musí být menší než 0,3 % vzdálenosti letadla od antény PAR nebo 15 ft (záleží na tom, která hodnota je větší)
- Rozlišovací schopnost v azimutu by měla odpovídat hodnotě $1,2^\circ$ - u typu PAR RPL-5M je rozlišovací schopnost do vzdálenosti 25 km $1,5^\circ$, ve vzdálenosti nad 25 km 1°

Maximální přípustné chyby u přesnosti radaru v elevaci:

- Odchylka od osy přiblížení max. 0,4 % ze vzdálenosti letadla od antény PAR + 10 % lineární odchylky letadla od zvolené sestupové osy, nebo 20 ft (záleží na tom, která hodnota je větší)
- Chyba v bodu dotyku musí být menší než 20 ft
- Chyba zobrazení indikátoru musí být menší než 0,2 % vzdálenosti letadla od antény PAR nebo 10 ft (záleží na tom, která hodnota je větší)
- Rozlišovací schopnost v elevaci by měla odpovídat hodnotě 0,6 % - u typu PAR RPL-5M je rozlišovací schopnost do vzdálenosti 25 km $1,2^\circ$, ve vzdálenosti nad 25 km $0,8^\circ$

Maximální přípustné chyby v měření vzdálenosti:

- Chyba v měření vzdálenosti letadla od bodu dotyku musí být menší než 3 % této vzdálenosti + 100 ft
- Rozlišovací schopnost v dálce by měla odpovídat hodnotě 400 ft, u typu PAR RPL-5M je rozlišovací schopnost do vzdálenosti 30 km 1,2 % vzdálenosti letadla od antény PAR nebo 120 m (záleží na tom, která hodnota je větší)

8.2 Chyby vyskytující se při činnosti PAR

Asi největším nedostatkem, obecně radarových zařízení je tzv. clutter. Vysílané radarové signály se odráží téměř od všech povrchů v dosahu radaru i od těch nežádoucích. Ty pak mohou způsobit značné potíže s výkonem radaru. V souvislosti s clutterem pak můžeme rozlišovat clutter plošný a objemový a bodový. Plošným clutterem se rozumí nechtěné odrazy od terénu nebo hladiny moře, kdy se signál může odrážet od vln. Odrazy způsobené vlivem počasí, tedy deštěm, kroupami a dalšími meteorologickými útvary, považujeme za clutter objemový. Bodovým clutterem pak uvažujeme vysoké budovy, ptáky nebo dokonce také hmyz. Existuje však způsob, jak tyto chyby odstranit. Jelikož se letadla pohybují rychleji než počasí nebo např. vlny na mořské hladině, systém MTI (Moving Target Indicator) dokáže rozpoznat signály odražené od letadel na základě porovnání jejich rychlostí a trajektorií.²²

9. Možnosti navedení podle GPS

Z důvodu větších požadavků na dostupnost, integritu a kontinuitu byla zavedena diferenční metoda (DGNSS), která tyto požadavky splňuje a výrazně tak zlepšuje přesnost měření. Součástí GPS jsou 3 základní segmenty: řídicí, kosmický a uživatelský. Metoda DGNSS rozšiřuje možnosti těchto segmentů a zvyšuje tak bezpečnost navádění letadel při přiblížení na přistání.

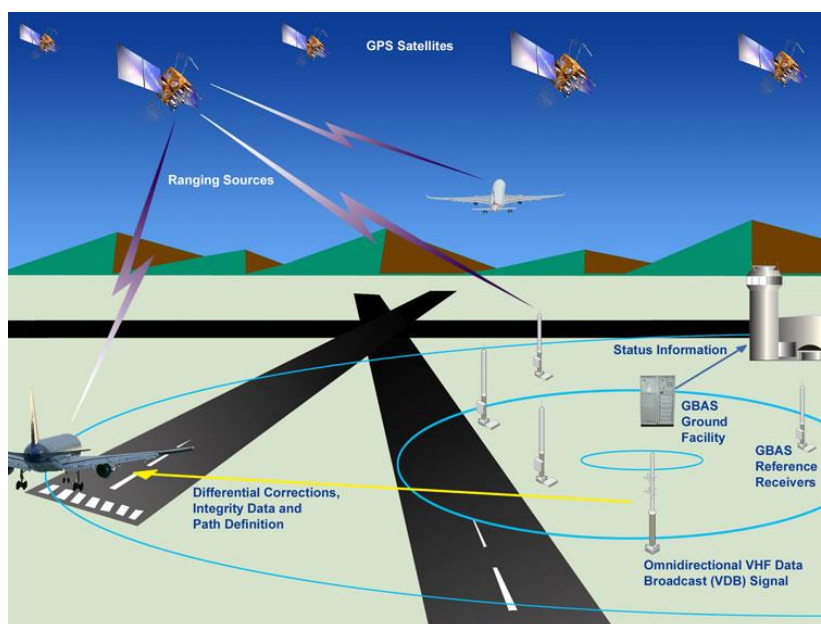
Kosmický segment zahrnuje daný počet navigačních družic. V dnešní době kolem Země obíhá 32 navigačních satelitů na 6 oběžných drahách s dobou oběhu necelých 12 hodin. Díky tomu se v 95 % času nad obzorem pohybují 4 viditelné družice a tím pádem uživatelé dokážou zjistit svou polohu v jakémkoli časovém okamžiku. Metoda rozšiřující tento segment se nazývá SBAS (Satellite-based Augmentation System). Tuto metodu jsme si popsali v kapitole 5.3, kdy jsme se seznámili s evropským systémem EGNOS.

Uživatelský segment v souvislosti s leteckým provozem reprezentuje palubní část letadla. GPS vybavení zahrnuje anténu, přijímač signálu, navigační počítač a displej. Ve spolupráci s navigačními družicemi pak piloti dokážou zjistit polohu, rychlost i čas. Rozšíření palubní části se implementuje pomocí metody ABAS (Aircraft-based Augmentation System). Tento systém integruje informace získané z prvků GNSS s informacemi dostupnými na palubě letadla. Této funkce lze dosáhnout 2 způsoby:²³

- RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) – metoda, která využívá pouze signálů poskytovaných GPS přijímači
- AAIM (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring) – metoda, která integruje signál GPS s dalšími navigačními senzory (INS, IRS, výškoměr, apod.)

Nás však z pohledu problematiky navádění letadel na přistání bude nejvíce zajímat segment pozemní. Jeho úlohou je monitorovat a řídit činnost navigačních družic kosmického segmentu. Části pozemního segmentu tvoří hlavní řídicí stanice a pozorovací stanice, které jsou rozmístěny po celém světě. Ty sbírají data z družic, které následně přeposílají do hlavní řídicí stanice. Tam počítače přijaté informace zpracují a vyhodnotí přesnou polohu družice na oběžné dráze. Pozemní segment je rozšiřován pomocí metody GBAS (Ground-based Augmentation System), známé také jako LADGPS (Local Area Differential GPS).

GBAS rozšiřuje signály GNSS, aby byly dostatečně přesné a spolehlivé pro použití při přiblížení a přistání letadel. Toho se dosahuje zajištěním integrity a zvýšením přesnosti signálu. Systém tvoří několik částí: referenční stanice (přijímače), pozemní zařízení, vysílač VHF. Referenční stanice přijímá signál z družic pomocí GPS antén. Jednotka zpracování dat signál vyhodnotí a vypočítá korekční zprávu. Ta je vysílána nepřetržitě a všesměrově pomocí VHF vysílače v okruhu přibližně 23 NM od letiště. Přijetím této zprávy na palubě letadla pak piloti získají data potřebná k bezpečnému provedení přiblížení na přistání: informace o referenčním čase, data pro konečné přiblížení, korekce pseudovzdálenosti nebo informace o dostupnosti zařízení pro určení vzdálenosti. Tyto informace pak umožňují pilotům provádět automatické přistání i za snížené viditelnosti.²⁴



Obrázek 12: Systém GBAS

Použití GBAS na přesné přiblížení je popsáno jako GLS (GBAS Landing System) a je alternativou, již dříve popisovaného systému ILS. Systém GLS má oproti ILS několik výhod. Tou nejzásadnější je větší flexibilita při volbě přibližovacích trajektorií. GLS umožňuje navádění letadla ze všech směrů pod různými úhly a také možnost volby zakřivených trajektorií. Zobrazení přistávacích prostorů na palubě zajišťuje avionika GBAS, která je součástí přijímače MMR (Multi Mode Receiver). Ten dokáže přijímat nejen signál GLS, ale také signály z ostatních navigačních zařízení ILS, MLS, VOR ad. Služby přiblížení GLS můžeme podle výkonnostních a funkčních požadavků rozdělit na několik druhů (podobně jako ILS):²⁵

- GAST A: provoz APV I (přiblížení s vertikálním vedením)
- GAST B: provoz APV II
- GAST C: provoz CAT I (s využitím frekvence L1)
- GAST D: provoz CAT II/III (pro CAT III je kvůli vysokým požadavkům na přesnost a integritu zapotřebí interoperability se systémem Galileo nebo využívání GPS frekvence L5)
- GAST E: provoz CAT I (s využitím frekvence L5)
- GAST F: provoz CAT II/III (s využitím frekvencí L1 a L5)²⁶

9.1 Chyby GPS měření

Chyba polohy je rozdílem mezi vypočítanou a aktuální polohou.¹⁸ Pravděpodobnost výskytu této chyby by neměla přesáhnout 5 %. Jinými slovy, odchylka vypočítané polohy v určitém místě, by se měla pohybovat v rozmezí, které je definováno předpisem, s pravděpodobností 95 %.¹⁸ V systému GPS se však vyskytuje mnoho nedokonalostí, které snižují přesnost a zvyšují tak pravděpodobnost výskytu této chyby.

Atmosférické chyby jsou jedny z nejvýznamnějších. K výpočtu vzdálenosti mezi družicí a pozemní stanicí je potřeba naměřit čas, za který se vyslaný signál dostane k přijímači. Při tomto procesu je důležitou veličinou také rychlost světla. Vlivem ionosféry, však dochází ke změnám rychlosti i směru šíření elektromagnetických vln.²⁸ Ve výsledném měření pak získáme zkreslené údaje o pseudovzdálenosti, která se vlivem atmosféry může zkrátit, nebo naopak prodloužit. Signál nejvíce ovlivňuje troposféra a ionosféra kde dochází k refrakci. V troposféře se nachází vodní páry, které zabraňují disperzi vlnění. Refrakci v ionosféře mají na svědomí volné elektrony, které mění již dříve zmíněné vlastnosti šíření – rychlost a směr. Nežádoucí účinek ionosféry je větší ve dne než v noci a dokáže způsobit chyby větší než 10 m.

Navigační družice jsou vybaveny atomovými hodinami. I přes jejich velkou přesnost tyto hodiny nakumulují každé 3 hodiny nepřesnosti v řádech biliontin vteřiny. Dokonce i tak malé odchylky můžou v konečném výsledku způsobit chybu 30 cm. Monitorováním a prováděním výpočtů potřebných k odstranění těchto nepřesností, lze získat skutečný čas přenosu signálu. Ani důkladným monitorováním však nemůžeme předejít všem nepřesnostem. Zbývající chyby, které se v provozu satelitních hodin vyskytují, můžou vyvolat odchylky zhruba 1 m. Nedokonalosti v měřené délce mohou zapříčinit také hodiny přijímače. Ty nejsou tak technologicky vyspělé jako hodiny satelitní. Chyba hodin přijímače je řešena početně pomocí dat přijímaných min. ze 4 družic.

Přesné informace o poloze družic jsou alfa a omega v měření pomocí GPS. Přesnost výpočtů může být ovlivněna i odchylkami v předpovědích drah navigačních satelitů, které jsou přenášeny na trase družice - přijímač. Chyby způsobené těmito předpověďmi odpovídají řádově několika metrům.

Ani technologie GPS se nevyhne problémům s vícecestným šířením a útlumem signálu. Jakékoliv překážky (budovy, stromy, silné elektromagnetické pole) mezi satelitem a přijímačem zapříčiní odraz nebo pohlcení signálu. Kvůli tomu pak výkon signálu může klesnout

až na hodnoty, které se nachází pod úrovní citlivosti přijímače. Těmto problémům se dá předcházet dvěma způsoby:

- Instalací krycího talíře na anténě
- Polarizací signálu – GPS signál je pravotočivě polarizovaná vlna, naproti tomu odražené signály jsou polarizovány levotočivě (moderní antény dokážou tento vliv redukovat)

9.2 Požadavky na přesnost podle předpisu L10

Přesnost v měření vzdálenosti GPS SPS:

	Celosvětový průměr 95 % času	Nejhorší místo 95 % času
Chyba horizontální polohy	9 m (30 ft)	17 m (56 ft)
Chyba vertikální polohy	15 m (49 ft)	37 m (121 ft)

Tabulka 2: Limity pro přesnost určení polohy pomocí GPS (SPS)

Další požadavky na přesnost měření vzdálenosti pomocí GPS SPS (s pravděpodobností 95 %):¹⁸

- Chyba měření vzdálenosti kterékoli družice nesmí přesáhnout hodnotu 30 m (100 ft)
- Chyba měření vzdálenosti kterékoli družice mezi časem vygenerování a použití dat nesmí přesáhnout hodnotu 7,8 m (26 ft)
- Chyba v určení rychlosti změny nesmí být větší než 0,006 m/s
- Chyba v určení zrychlení změny vzdálenosti nesmí být větší než 0,002 m/s²

Požadavky na přesnost měření vzdálenosti pomocí SBAS (s pravděpodobností 95 %):¹⁸

- Chyba měření vzdálenosti, bez zahrnutí atmosférických vlivů, nesmí být větší než 25 m
- Chyba v určení rychlosti změny vzdálenosti nesmí být větší než 2 m/s
- Chyba v určení zrychlení změny vzdálenosti nesmí být větší než 0,019 m/s²
- Pravděpodobnost výskytu chyby přesahující 150 m (490 ft) v libovolnou hodinu nesmí být větší než 10⁻⁵
- Pravděpodobnost výpadku určení vzdálenosti od družic SBAS v libovolnou hodinu nesmí být větší než 10⁻³

Požadavky pro službu přiblížení GBAS:

Typická operace	Horizont. přesnost 95% (1)(3)	Vertikální přesnost 95% (1)(3)	Integrita (2)	Čas do výstrahy (3)	Spojitosť (4)	Dostupnost (5)
Let po trati	3,7 km (2,0 NM)	nepoužito	$1 - 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 10^{-4}/h$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 až 0,99999
Let po trati, konečná fáze	0,74 km (0,4 NM)	nepoužito	$1 - 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 10^{-4}/h$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 až 0,99999
Počáteční přiblížení, střední přiblížení, nepřesné přístrojové přiblížení (NPA), odlety	220 m (720 ft)	nepoužito	$1 - 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 10^{-4}/h$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 až 0,99999
Přístrojové přiblížení s vertikálním vedením (APV-I)	16,0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ na každé přiblížení	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 až 0,99999
Přístrojové přiblížení s vertikálním vedením (APV-II)	16,0 m (52 ft)	8,0 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ na každé přiblížení	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 až 0,99999
Přesné přiblížení kategorie I (7)	16,0 m (52 ft)	6,0 m až 4,0 m (20 ft až 13 ft) (6)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ na každé přiblížení	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 až 0,99999

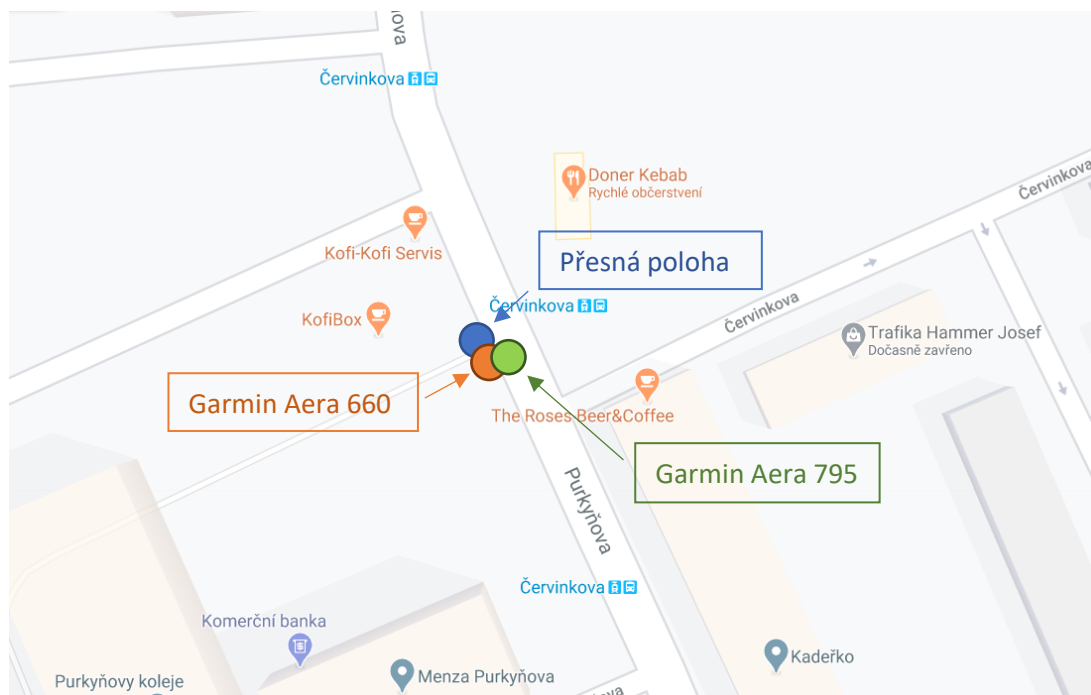
Obrázek 13: Požadavky na přesnost měření pomocí GBAS

9.3 Přesnost přijímače ProMark3

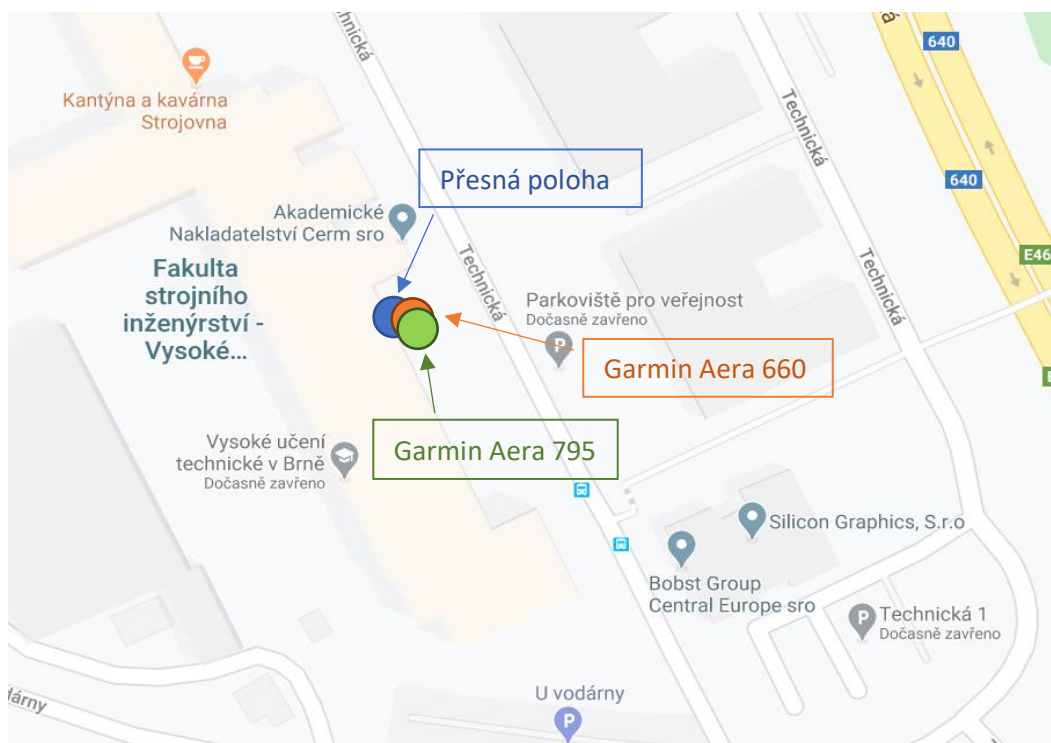
ProMark3 poskytuje autonomní přesnost 3 m všude na světě za předpokladu, že přijímač sleduje 5 satelitů GPS, což je splněno téměř vždy. Pomocí diferenciálních korekcí zajišťovaných zabudovaným přijímačem SBAS, však přístroj dokáže v horizontálním směru navádět i s přesností 50 až 70 cm. K použití funkce s takovou přesností je potřeba přijímat signál systémů EGNOS nebo WAAS podle toho, kde s právě nacházíte. Diferenciální korekce můžou poskytnout také pozemní majáky.²⁷

9.4 Měření pomocí GPS

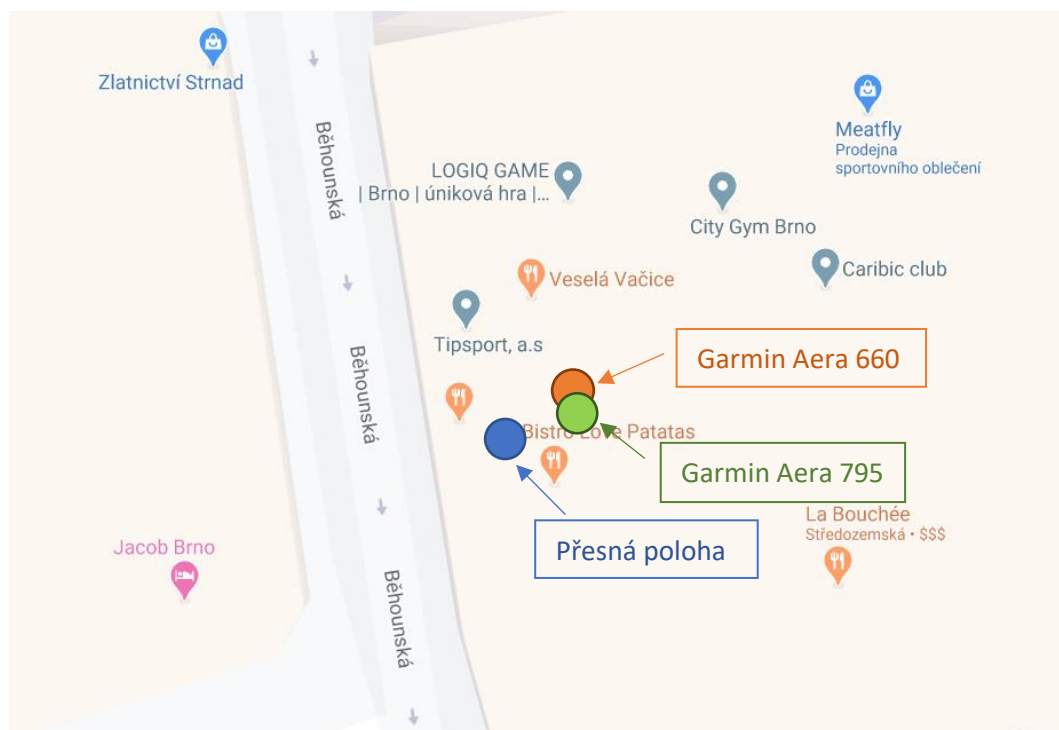
Měření probíhalo dne 24.6. v deštivých podmínkách při přibližně 18°C s přístroji Garmin Aera 660 a Garmin Aera 795. Jako první úlohu jsem si zvolil porovnání přesnosti těchto dvou zařízení. Všechna měření byla statická, na zvolených lokacích a s využitím signálu GPS.



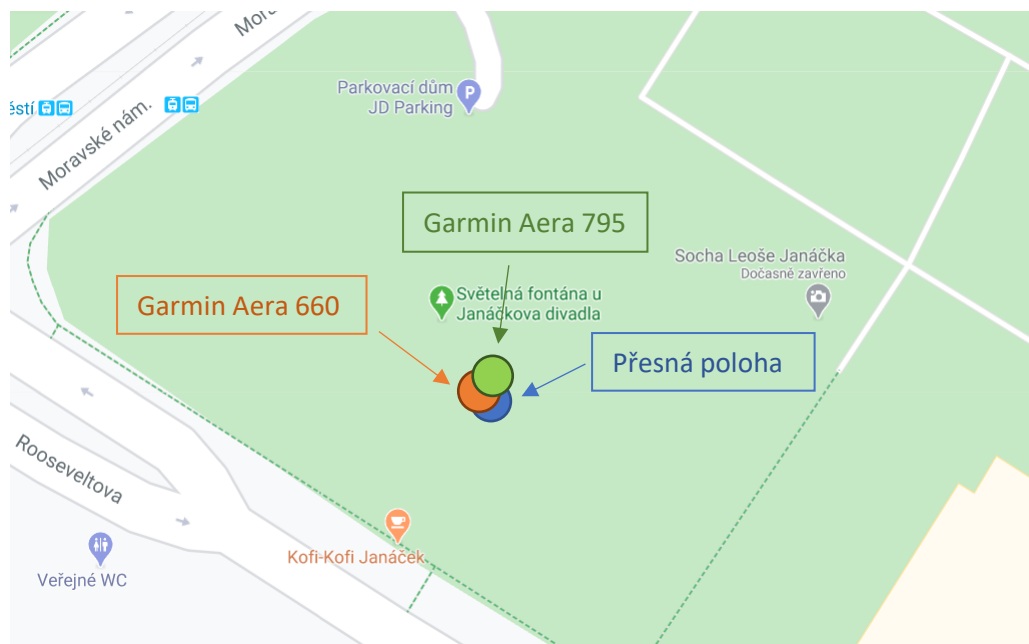
Obrázek 14: Lokace 1



Obrázek 15: Lokace 2



Obrázek 16: Lokace 3



Obrázek 17: Lokace 4

Z měření lze vypožorovat, že v zastavěnějších oblastech je odchylka od přesné polohy větší než v místech, kde je překážek méně. U lokace 3 je odchylka největší – měřil jsem z balkónu bytového domu, který je situován v hustě zastavěném prostředí a s největší pravděpodobností zde došlo k odrazu nebo útlumu signálu GPS. Na otevřenějších lokacích byla přesnost podstatně větší a nepřesáhla odchylku 3 m.

Další úlohu, kterou jsem se rozhodl řešit je porovnání přesnosti signálů GPS a GLONASS. K tomu jsem využíval zařízení Garmin Aera 660. Měření probíhalo za stejných podmínek a na stejných lokacích jako v předcházející úloze. Výsledky měření jsou znázorněny v následující tabulce.

	GPS	GLONASS
	Přesnost (odchylka)	Přesnost (odchylka)
Lok. 1	3 m	2 m
Lok. 2	3 m	3 m
Lok. 3	4 m	6 m
Lok. 4	3 m	3 m

Tabulka 3: Porovnání přesnosti signálů GPS a GLONASS

Z měření vyplývá, že při statickém měření je rozdíl mezi těmito dvěma signály minimální. Lepší výkon sice vykazoval signál GPS, ale průměrný rozdíl nepřesahuje odchylku 25 cm. Porovnáme-li výsledné hodnoty odchylek s požadavky na přesnost systému GPS, můžeme konstatovat, že odchylky statických měření se nachází v toleranci udávané předpisem L10. I přesto, že jsme prováděli pouze statická měření, trůufám si tvrdit, že systém GPS poskytuje velmi přesné údaje i pro navádění letadel na přistání.

10. Závěr

Cílem této práce bylo porovnání metod přesného přiblížení na přistání. V první části práce jsem se snažil popsat jednotlivé systémy, jejich části a podstatu funkce. Začal jsem tradičními navigačními prostředky ILS a MLS, které jsou technologicky nejstarší. Do dnes jsou však tyto systémy využívány a plní funkci primárních navigačních zařízení na mnoha letištích. Technologický vývoj však posunul oblast navigace na vyšší úroveň a s ní se také zvýšily požadavky kladené na provoz navigačních prostředků z hlediska bezpečnosti a přesnosti. Snažil jsem se tedy představit způsob navigace letadel v podobě metody PBN, kdy nejzásadnějším pokrokem bylo zvýšení efektivity provozu. Do letectví byla tato metoda zaváděna pomocí aplikací RNAV a RNP, jejichž specifikace jsou popsány v kapitolách 4.1 a 4.2. Další technologií, kterou jsem se zabýval byla metoda GNSS. Stejně jako u předcházejících systému i tady jsem se zaměřil na princip fungování jednotlivých součástí systému. Seznámil jsem vás i s evropským navigačním systémem Galileo a s ním spjatou technologií EGNOS.

V druhé části jsem porovnal a analyzoval jednotlivé metody z pohledu přesnosti. Systémy jako ILS, MLS a PAR samozřejmě splňují veškeré požadavky k tomu, aby sloužily jako zařízení využívaná při přiblížení na přistání. Porovnáním s metodou využívající satelitní navigaci jsem se snažil dokázat, že i technologie GNSS má předpoklady k tomu, aby se stala primárním navigačním zařízením. Jako příklad jsem zvolil americký satelitní systém GPS. Samotná soustava podmínky dané předpisem nesplňuje. Nicméně díky diferenciální metodě, která monitoruje a opravuje chyby vyskytující se v procesu měření a výrazně tak zvyšuje přesnost, se GPS dostalo na úroveň, kdy je tato technologie použitelná i při navigaci letadel na přistání. Zaměřil jsem se hlavně na metodu GBAS, jejíž podstatou je zdokonalení pozemního segmentu. Součinností se systémem Galileo pak GBAS umožňuje přesné automatické řízení letadel na přistání i v tom nejpřísnějším měřítku. Požadavky na integritu, přesnost, dostupnost a nepřetržitost, splňuje GBAS ve všech směrech a s největší pravděpodobností v dohledné době nahradí tradiční navigační prostředky ILS, MLS a PAR.

11. Seznam použitých zkratk

AAIM... Autonomní monitorování integrity letounu (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring)

ABAS... Systém s palubním rozšířením (Aircraft-Based Augmentation System)

AFI... Afrika a Indický oceán (Africa - Indian Ocean)

ATS... Letové provozní služby (Air Traffic Services)

A-RNP... Pokročilé RNP (Advanced RNP)

B-RNAV... Základní RNAV (Basic RNAV)

CAT... Kategorie (Category)

CMN... Šum ovládání (Control Motion Noise)

DGNSS... Diferenční globální družicový navigační systém (Differential Global Navigation Satellite System)

DME... Měřič vzdálenosti (Distance Measuring Equipment)

EGNOS... Evropská podpůrná geostacionární navigační služba (European Geostationary Navigation Overlay Service)

GAGAN... Podpůrná rozšířená GPS navigace (GPS Aided Augmented Navigation Geo)

GAST... Typ služby přiblížení podle GBAS (GBAS Approach Service Type)

GBAS... Systém s pozemním rozšířením (Ground-Based Augmentation System)

GLONASS... Globální navigační satelitní systém na oběžné dráze (Global Orbiting Navigation Satellite System)

GLS... přistávací systém GBAS (GBAS Landing System)

GNSS... Globální družicový navigační systém (Global Navigation Satellite System)

GPS... Globální systém určení polohy (Global Positioning System)

ILS... Systém pro přesné přiblížení a přistání (Instrument Landing System)

IM... Vnitřní polohové návestidlo (Inner Marker)

INS... Inerční navigační systém (Inertial Navigation System)

IRS... Inerční referenční systém (Inertial Reference System)

LADGPS... Lokální diferenční globální polohovací systém (Local Area Differential Global Positioning System)

LLZ... Kurzový maják (Localizer)

MLS... Mikrovlnný přistávací systém (Microwave Landing System)

MM... Střední polohové návestidlo (Middle Marker)

MMR... Více režimový přijímač (Multi Mode Receiver)

MSAS ... MTSAT satelitní rozšiřovací systém (MTSAT satellite-based augmentation system)

MTSAT... Multifunkční transportní satelit (Multi-Function Transport SATellite)

MTI... Indikátor pohyblivého cíle (Moving Target Indicator)

OM... Vnější polohové návěstidlo (Outer Marker)

PAR... Přesný přibližovací radar (Precision Approach Radar)

PBN... Navigace založená na výkonnosti (Performance-Based Navigation)

PFE... Chyba zadání trajektorie (Path Following Error)

PFN... Šum sledování trajektorie (Path Following Noise)

PPS... Přesná služba určování polohy (Precise Positioning System)

P-RNAV... Přesný RNAV (Precision RNAV)

RAIM... Autonomní monitorování integrity přijímače (Receiver Autonomous Integrity Monitoring)

RNAV... Prostorová navigace (Area Navigation)

RNP... Požadovaná navigační výkonnost (Required Navigation Performance)

RNP APCH... Požadovaná navigační výkonnost pro přiblížení (RNP Approach)

RNP AR APCH... Požadovaná navigační výkonnost pro přiblížení vyžadující autorizaci (RNP Authorization Required Approach)

RWY... Dráha (Runway)

SACCSA... Rozšiřující řešení pro Karibik, Střední a Jižní Ameriku (Augmentation Solution for Caribbean, Central and South America)

SBAS... Systém s družicovým rozšířením (Satellite-Based Augmentation System)

SDCM... Systém pro diferenční korekce a monitorování

SNAS... Družicový navigační systém zvětšování

SPS... Standardní služba určování polohy (Standard Positioning System)

SVD... Směrový vyzařovací diagram (Directional radiation pattern)

VHF... Velmi krátké vlny (Very High Frequency)

VOR... VKV všesměrový radiomaják (VHF Omnidirectional Radio Range)

WAAS... Systém rozšíření široké oblasti (Wide Area Augmentation System)

WADGPS... Diferenční globální polohovací systém široké oblasti (Wide Area Differential GPS)

12. Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Úřad pro civilní letectví. *Letecký předpis L8168/I: Provoz letadel - letové postupy* [online]. Uveřejněno pod č. j. : 1285/2003-220-SP/1. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2000, DD-17 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [2] VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-448-6.
- [3] Uplatnění nařízení (EK) č. 2016/539. *Úřad pro civilní letectví* [online]. 2016 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/zpusobilost-leteckeho-personalu/uplatneni-narizeni-ek-c-2016-539/>
- [4] ILS. *Wiki.vacc.cz* [online]. 2011 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://wiki.vacc-cz.org/index.php?title=ILS>
- [5] Instrument Landing System. *Cs.wikipedia.org* [online]. 2008 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Instrument_Landing_System
- [6] Microwave Landing System. *En.wikipedia.org* [online]. 2014 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_landing_system
- [7] Performance Based Navigation (PBN). *SKYbrary* [online]. 2015 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Performance_Based_Navigation_\(PBN\)#](https://www.skybrary.aero/index.php/Performance_Based_Navigation_(PBN)#)
- 8 Area Navigation (RNAV). *SKYbrary* [online]. 2017 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Area_Navigation_\(RNAV\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Area_Navigation_(RNAV))
- [9] Required Navigation Performance (RNP). *SKYbrary* [online]. 2017 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Required_Navigation_Performance_\(RNP\)#](https://www.skybrary.aero/index.php/Required_Navigation_Performance_(RNP)#)
- [10] How GNSS works? *Geospacial World* [online]. Geospatial Media and Communications, 2019 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.geospatialworld.net/blogs/how-gnss-works/>
- [11] Global Navigation Satellite Systems. *Hemisphere* [online]. Hemisphere GNSS, 2019, 19.2.2019 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.hemispheregnss.com/knowledge-base/>
- [12] *Satellite Navigation*. Technische Universität München [online]. Institute of Flight System Dynamics [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.fsd.lrg.tum.de/research/sensors-data-fusion-and-navigation/research-and-competence-areas/satellite-navigation/?fbclid=IwAR0BWciQW5sBgZ6xVUrrC-qPYuo47if-pOsr9SKv624P-76HwMk0k-bXhnA>
- [13] *PBN Implementation Workshop from Industry Perspective RNAV, RNP & RNP AR* [online]. ICAO, 2015 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.icao.int/MID/Documents/2015/AFI-MID%20ASBU%20Impl.%20Workshop/2.1-3%20AIRBUS%20PBN%20Impl.%20from%20Industry%20perspective.pdf>

[14] *RNP AR APCH* [online]. www.icao.int, 2015 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/PBN%20and%20Associated%20PANS-OPS%20Provisions%20Workshops/PBN%20and%20Associated%20PANS-OPS%20Provisions%20Implementation%20Workshop%20Belarus/PBN%20and%20PANS%20OPS%20Imp%20Wkshp%20BLR%20PPT18.pdf>

[15] What is Galileo? *European Space Agency* [online]. ESA, 2016 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo

[16] Navigační systém Galileo a kde zjistit, která zařízení s ním umějí pracovat. *Geobusiness* [online]. Springwinter, 2018, 16.1.2018 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.geobusiness.cz/navigacni-system-galileo/>

[17] About EGNOS. *EGNOS User Support* [online]. European Global Navigation Satellite Systems Agency [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/egnos-system/about-egnos

[18] Úřad pro civilní letectví. *Letecký předpis L10/I: O civilní letecké telekomunikační službě svazek I - Radionavigační prostředky* [online]. Uveřejněno pod č. j. : 1285/2003-220-SP/1. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2000 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>

[19] Microwave Landing System. *RNAV 2009* [online]. Aircraft Technical Book Company, 2009, 165 - 171 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.aircraftspruce.com/catalog/pdf/13-08721.pdf>

[20] RADCLIFFE, Rodger a Michael F. DIBENEDETTO. *Siting Criteria for Microwave Landing System* [online]. 1986 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/pm86-18.pdf>

[21] Precision Approach Radar. *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp30.en.html>

[22] Radar Clutter. *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/11.coherent/co04.en.html>

[23] Aviation Applications. *European Space Agency* [online]. 2011 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Aviation_Applications#ABAS

[24] Ground Based Augmentation System. *SKYbrary* [online]. 2015 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Ground_Based_Augmentation_System_\(GBAS\)#](https://www.skybrary.aero/index.php/Ground_Based_Augmentation_System_(GBAS)#)

[25] GBAS Landing System. *SKYbrary* [online]. 2015 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/GBAS_Landing_System_\(GLS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/GBAS_Landing_System_(GLS))

[26] *Air Traffic Management and Systems III* [online]. Tokyo: Springer, 2017 [cit. 2020-04-15]. ISBN 978-981-13-7086-1. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=f_eDwAAQBAJ&pg=PA163&lpg=PA163&dq=gast+f+approach&source=bl&ots=iLJET1he8l&sig=ACfU3U3DuY6fVBstE-

2gTDvxJ43IL_ELFg&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjw5uzz_cboAhVEhlwKHaGAB_AQ6AEwAHoECAwQLA#v=onepage&q=gast%20f%20approach&f=false

[27] *ProMark3 Reference Manual* [online]. Magellan Navigation [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://engineersinaction.org/wp-content/uploads/2017/01/ProMark-3-Reference-Manual.pdf>

[28] KADAVA, Marek. *Porovnání účinností řízení přesného přibližování letadla na přistání pomocí tradičních LNZ s účinností navedení podle LADGPS*. Brno, 2011. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6434/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Brno. Vedoucí práce Vosecký Slavomír.

13. Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1: Vyzařování signálů kurzového majáku.....	11
Obrázek 2: Vyzařované signály GS.....	12
Obrázek 3: Prostor volby možných přiblížení.....	13
Obrázek 4: Princip činnosti azimutálního majáku.....	14
Obrázek 5: Přehled navigačních specifikací.....	15
Obrázek 6: Oblasti působnosti SBAS systémů.....	18
Obrázek 7: Příklad kritických a citlivých prostorů.....	19
Obrázek 8: Vícecestné šíření uvnitř laloku (in-beam).....	21
Obrázek 9: Vícecestné šíření mimo lalok (out-of-beam).....	21
Obrázek 10: Typické kritické a citlivé prostory pro azimutální rovinu.....	22
Obrázek 11: Typické kritické a citlivé prostory pro vertikální rovinu.....	22
Obrázek 12: Systém GBAS.....	25
Obrázek 13: Požadavky na přesnost měření pomocí GBAS.....	28
Obrázek 14: Lokace 1.....	28
Obrázek 15: Lokace 2.....	29
Obrázek 16: Lokace 3.....	29
Obrázek 17: Lokace 4.....	30
Tabulka 1: Signály polohových návěstidel.....	12
Tabulka 2: Limity pro přesnost určení polohy pomocí GPS (SPS).....	27
Tabulka 3: Porovnání přesnosti signálů GPS a GLONASS.....	30